

УДК 53.091

**УДАЛЕНИЕ ОСТАТКОВ ПОРОШКА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ ТРЕХМЕРНОЙ
ЯЧЕЙСТОЙ КОНСТРУКЦИИ СО СТРУКТУРОЙ ГИРОИДА**

М.П. Козадаева, Д.А. Храпов

Научный руководитель: старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., М.А. Сурменева

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: mariakoz71@gmail.com

**POWDER REMOVAL FROM THREE-DIMENSIONAL CELLULAR GYROID STRUCTURE USING
ULTRASONIC VIBRATION**

M.P. Kozadaeva, D.A. Khrapov

Scientific Supervisor: Senior Researcher, Ph.D., M.A. Surmeneva

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: mariakoz71@gmail.com

Abstract. *An ultrasonic vibration post-treatment process was suggested for additively manufactured structures for powder removal. The aim of the present research was to investigate the differences in morphology and mechanical behavior of Ti_6Al_4V grid structures after ultrasonic vibration treatment.*

Введение. Создание и внедрение имплантатов, способных замещать или восстанавливать дефекты костной ткани, является актуальной проблемой мультидисциплинарных исследований. В данной области хорошо себя показали титановые сетчатые конструкции. Целью изготовления таких структур является создание подходящей среды для врастания тканей и достижение определенных механических свойств. Использование аддитивных технологий, в частности метода электронно-лучевой плавки (ЭЛП), для производства изделий для медицины позволяет создавать из металла конструкции сложных форм с системой взаимосвязанных пор в более короткие сроки. Форма пор существенно влияет на механические характеристики изделия [1]. Трижды периодические поверхности минимальной энергии (ТППМЭ) – математически определенная непрерывная бесконечно повторяющаяся в трёх измерениях структура с минимальной поверхностью [2]. Использование топологии ТППМЭ в конструкциях имплантатов оптимизирует технологию производства с использованием аддитивных технологий, позволяет математически контролировать такие параметры, как пористость, размер и форма пор, взаимосвязь между порами, получать изделия с повышенными биомеханическими свойствами и возможностью более равномерного распределения клеток при врастании [3]. Проведение механических испытаний является важнейшим этапом разработки имплантатов.

Постобработка изделий порошковой металлургии является важным этапом производства, так как наличие отдельных частиц порошка на поверхности конструкций недопустимо при использовании их в медицине, а также из-за предполагаемого отрицательного влияния на механические свойства.

Экспериментальная часть. Первым этапом разработки было компьютерное моделирование структуры гироида, с использованием программ Mathematica и MeshLab. В модели была установлена

толщина стенок образцов 0,2 и 0,4 мм. Для удобства далее образцы будут называться М2 и М4 соответственно. Гироидные Ti_6Al_4V структуры с пористостью 28 и 30 % были изготовлены на установке для послойного электронно-лучевого плавления ARCAM A2 EBM (Мельндааль, Швеция) в стандартном режиме «melt multibeam». Топографический анализ осуществлялся с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Quanta 200 3D, FEI. Механические испытания на сжатие проводились на установках INSTRON 3369 и INSTRON 5582, соответственно.

Часть образцов после производства подверглись очистке от полуспеченных частиц порошка в два этапа. Первым этапом являлась очистка с помощью стандартной системы восстановления порошка (ССВП) от Arcam EBM, которая использует технологию дробеструйной очистки [4], одновременно очищая компоненты от полуспеченного порошка и собирая порошок для повторного использования.

Вторым этапом очистки, был использован метод удаления порошка с помощью ультразвуковой вибрации (УЗВ) на базе коммерческого оборудования Sonic Swiss Boster 20 кГц [5]. Приводная головка УЗВ коммерческой системы крепится к модифицированной стойке серийного настольного сверла с добавленной армирующей нижней пластиной и креплением для ультразвуковой вибрационной головки. Электропитание от коммерческой системы УЗВ позволяет регулировать мощность вибрации. Очистку выполняли в один этап путем осторожного сжатия плоских поверхностей образцов цилиндрических каркасов между лицевой стороной вибратора и нижней пластиной при мощности 35 кГц в течение 15 секунд при 75 % максимальной мощности. При проведении второго этапа очистки (УЗВ) наблюдалось отделение небольшого количества порошка, что свидетельствует о том, что полностью очистить образцы только с помощью метода ССВП件 невозможно.

Результаты. На рис. 1а видно, что на поверхности конструкции и внутри каналов до очистки ультразвуком наблюдается минимальное количество припавленных частиц порошка металла, по сравнению с образцами, полученными методом селективного лазерного плавления (СЛМ) в работе [6].

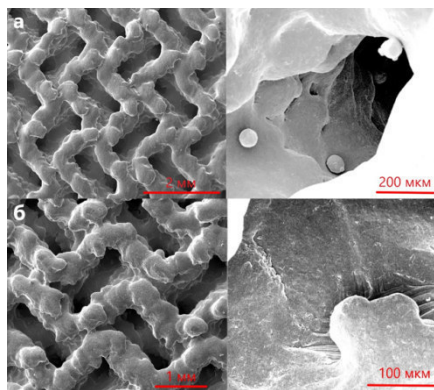


Рис. 1. Снимки СЭМ-образца сплава титана М4 с топологией ТППМЭ, полученного послойным электронно-лучевым плавлением: а – до обработки ультразвуком, б – после обработки ультразвуком

После обработки ультразвуком (рис. 1б) припавленных частиц порошка не наблюдается совсем. Стенки образцов имеют слоистую структуру без видимых пор внутри стенок, что является результатом полного сплавления частиц порошка.

Из таблицы 1 видно, что механические свойства образцов М2 и М4 между собой, до и после обработки отличаются в среднем менее чем на 10 %. Это связано с тем, что на практике толщина стенок

образцов оказалась равной 0,36 мм, не зависимо от номинальной толщины. Можно предположить, что это связано с особенностью оборудования и режима «melt».

Также постобработка ультразвуком не оказала значительного влияния на механические свойства. Предположительно, это значит, что частицы порошка, которые находились внутри каналов были расплавлены настолько незначительно, что не могли оказать влияние на структуру образцов, а, вследствие, и на их механические свойства

Таблица 1

Механические свойства образцов

Параметр	M2	M2 УЗ	M4	M4 УЗ
$P, \%$	30	34	28	32
$E, \text{ГПа}$	$5,78 \pm 0,04$	$5,85 \pm 0,10$	$5,84 \pm 0,02$	$5,76 \pm 0,06$
$\sigma_y, \text{МПа}$	$273,03 \pm 2,71$	$267,07 \pm 3,61$	$274,33 \pm 2,83$	$282,97 \pm 10,22$
$W, \text{МДж/м}^3$	$84,56 \pm 0,53$	$83,22 \pm 0,44$	$77,35 \pm 1,87$	$84,81 \pm 1,25$

Заключение. Несмотря на низкую пористость, образцы показали механические свойства близкие к соответствующим свойствам кортикальной кости. Минимальный модуль упругости 5,76 ГПа и максимальный предел текучести 283 МПа оказался у образца М4 после ультразвуковой очистки. Для кортикальной кости эти параметры соответственно равны 3–30 ГПа и 103 – 222 МПа. Топографический анализ показал, что с помощью ультразвука можно очистить от непропеченных частиц порошка даже такие плотные образцы с узкими каналами, не оказав значительного влияния на механические свойства.

Авторы выражают благодарность проф. А.В. Коптюгу за помощь в подготовке образцов и Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ20-73-10223.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Savio G., Rosso S., Meneghello R., Concheri G., Geometric modeling of cellular materials for additive manufacturing in biomedical field: a review // Applied Bionics and Biomechanics. – 2018. – № 3. – P. 1–14.
2. Blanquer S. B. G, Werner M., Hannula M., etc, Surface curvature in triply-periodic minimal surface architectures as a distinct design parameter in preparing advanced tissue engineering scaffolds // Biofabrication. – 2017. – № 9. – P. 1–12.
3. Ataee A., Li Y., Fraser D., etc, Anisotropic Ti-6Al-4V gyroid scaffolds manufactured by electron beam melting (EBM) for bone implant applications // Materials and Design. – 2018. – № 137. – P. 345–354.
4. Koptug A., Additive Manufacturing in metal: technology advances generate new research challenges // Нанотехнологии. – 2016. – № 4. – P. 12–24.
5. Khrapov D. The impact of post manufacturing treatment of functionally graded Ti6Al4V scaffolds on their surface morphology and mechanical strength // Integrative Medicine Research. – 2019. – № 2. – P. 1866–1881.
6. Mahmoud D., Elbestawi M.A., Selective laser melting of porosity graded lattice structures for bone implants // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – V.100. – P. 2915–2927.